DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170198

王恩军, 陈垣, 韩多红, 蔡子平, 张芬琴. 栽培方式对菘蓝农艺性状及产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170198
Wang E J, Chen Y, Han D H, Cai Z P, Zhang F Q. Effect of cropping pattern on agronomic characteristics, yield and quality of radix isatidis [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170198

栽培方式对菘蓝农艺性状及产量和品质的影响*

王恩军[1,2], 陈　垣[1,3**], 韩多红[2], 蔡子平[1,4], 张芬琴[2]

(1. 甘肃农业大学农学院　兰州　730070; 2. 河西学院农业与生物技术学院　张掖　734000; 3. 陇西中天药业有限责任公司　定西　748100; 4. 甘肃省农业科学院中药材研究所　兰州　730070)

摘　要: 栽培方式对中药材产量和品质影响较大。本研究为了探讨河西走廊绿洲灌溉区菘蓝的最佳栽培方式, 通过田间试验, 采用栽培模式(平作和垄作)和覆膜方式(不覆膜、覆白膜和覆黑膜)二因素随机区组试验设计, 设置 6 个处理。按照播种至收获每月一次定期采集菘蓝植株样品, 测定了 6 种栽培方式下菘蓝根农艺性状指标、板蓝根产量及检测成分(R,S)-告依春含量。结果表明, 不同栽培方式对菘蓝根长、根直径、单株根干重的累积动态、板蓝根产量和质量均具有显著影响。垄作覆黑膜栽培菘蓝根的快速生长持续期最长, 根系最发达, 根长、根直径和单株根干重均较高。板蓝根产量以垄作覆黑膜栽培最高(4 514.4 kg·hm^{-2}), 垄作覆白膜产量最低(3 116 kg·hm^{-2}); (R,S)-告依春含量以垄作覆白膜最高(2.61 g·kg^{-1}), 垄作不覆膜最低(0.137%)。在不同栽培方式下, 菘蓝主根长、根直径和单株根干重生长随生长时间均呈现"S"型生长趋势, 符合 Logistic 生长模型。河西走廊绿洲灌区菘蓝收获板蓝根适宜栽培方式为垄作覆黑膜栽培。

关键词: 菘蓝; 栽培方式; Logistic 生长方程; 根系农艺性状; 板蓝根产量; (R,S)-告依春含量
中图分类号: S513　**文献标识码:** A

Effect of cropping pattern on agronomic characteristics, yield and quality of radix isatidis*

WANG Enjun[1,2], CHEN Yuan[1,3**], HAN Duohong[2], CAI Ziping[4], ZHANG Fenqin[2],
(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agriculture and Biology, Hexi University, Zhangye 730070, China; 3. Longxi Zhongtian Pharmaceutical Co., Ltd, Dingxi 748100, China; 4. Institute of Chinese Herbal Medicine, Gansu Academy of Agricultural Sciences. Lanzhou 730070, China)

Abstract: Radix isatidis (*Isatis indigotica* Fort.), a biennial cruciferous plant, is an important traditional Chinese medicine that is extensively cultivated across China. Its main producing area is in the central region of Hexi Corridor in Qilian Mountaint. In 2012, Minle County in Ganshu Province was named the "hometown" of radix isatidis in China. However, standardized cultivation technique has been the main problem affecting the yield and quality of radix isatidis. Cropping pattern has been critical for yield and quality of Chinese medicinal plants. In order to explore the best cropping pattern for radix isatidis in irrigated oasis in Hexi Corridor, we designed a two-factor randomized block field experiment. One factor was the cultivation model (consisting of ridge plowing and flat breaking) and the other was film mulching (no film cover, white film cover and black film cover). The experiment included six cropping patterns — flat breaking without film mulching, flat breaking with white film mulching, flat breaking with black film mulching, ridge plow without film mulching, ridge plow with white film mulching, and ridge plow with black film mulching. The agronomic characteristics of root, yield and content of epigoitrin in radix isatidis under different treatments were determined every month for period from sowing to harvest. Results showed that under different cultivation methods, main root length, root diameter and root dry weight of individual plants tracked S-shaped curve across the growth stages that was best fitted by logarithmic growth equation. The differences in root yield under various cultivation methods were significant. While ridge plow with black film mulching had the highest yield (4 514.45 kg·hm^{-2}), ridge plow with white film mulching had the lowest yield (3 116.378 kg·hm^{-2}). Different treatments had significantly effects on epigoitrin content in radix isatidis. While ridge plow with white film mulching had

* 甘肃省高等学校科研项目(2015-0137)、河西学院青年基金项目(QN201409)、国家中药标准化研究项目(ZYBZH-Y-GS-11)、2015 年公益性(中药)科研专项项目(201507002)、兰州市科技局项目(2014-1-203)和甘肃省自然科学基金项目(145RJZG191)资助。
**通讯作者: 陈垣, 主要从事药用植物资源与利用研究。E-mail: cygcx1963@163.com
王恩军, 主要从事药用植物资源与利用研究。E-mail: wejspring@163.com
收稿日期: 2017-03-07; 接受日期: 2017-06-19
* This research were supported by the Scientific Research Project of Institutions of Higher Learning in Gansu Province (2015-0137), the Youth Fund of Hexi University (QN201409), the Research of National Standardization of Traditional Chinese Medicine, the Special Scientific Research Fund of Medical in Public Welfare of China (201507002), the Fund of Science and Technology Bureau of Lanzhou (2014-1-203) and the Natural Science Foundation of Gansu Province (145RJZG191).
**Corresponding author, E-mail: cygcx1963@163.com
Received Mar. 7, 2017; accepted Jun. 19 2017

the highest epigoitrin content (0.261%), ridge plow without film mulching had the lowest epigoitrin content (0.137%). Ridge plow with black film mulching cultivation method should be widely used in radix isatidis cultivation in the irrigated oasis in Hexi Corridor.

Keywords: *Isatis indigotica* Fort.; Cropping pattern; Logistic model; Agronomic characteristics; Radix isatidis yield; Epigoitrin content

菘蓝(*Isatis indigotica* Fort.)为十字花科(Cruciferae)菘蓝属两年生草本植物，以干燥叶和根入药，根称板蓝根，叶称大青叶，加工品称青黛[1]。大青叶和板蓝根具有清热解毒等功效[2]，已广泛用于治疗感冒、抗流感和抗病毒等方面[3]。我国栽培区主要分布在甘肃、黑龙江、河北、安徽等地，甘肃和黑龙江产量较大[4]。河西走廊民乐县2012年被中国特产之乡暨宣传活动组委会命名为“中国板蓝根之乡”。有关该地区板蓝根栽培方式的研究主要有黑膜全膜栽培技术[5]，垄作覆膜板蓝根套种王不留行[*Vaccaria segetalis* (Neck.) Garcke]高效栽培技术[6]，平作覆黑膜穴播栽培技术[7-8]等。目前对药材栽培方式的研究多集中在表观的产量增减方面，而有关农艺性状指标、根系的生长等理论层面模拟研究较少。Logistic生长曲线广泛应用于作物栽培和生态等方面的模拟研究中[9]，用于描述植物的生长周期、产量预估、干物质积累、果实、种群生长动态等[10-12]。但由于根系生长环境的不可视性以及测量技术的局限性，对根系的模拟研究发展迟缓[13]。陈亚楠等[14]研究表明，用Logistic曲线可较好地拟合丹参(*Salvia miltiorrhiza* Bunge)根部生长量与定植时间的关系。张文辉等[15]研究表明，泡沙参[*Adenophora tetraphylla* (Thunb.) Fisch]种群根系生物量累积过程符合Logistic增长规律。王文康等[16]研究表明，亚麻(*Linum usitatissimum* L.)根系体积和干重的增长符合Logistic生长方程。本研究结合前人研究方法，综合生产中实际用到的栽培方式，设置栽培模式和覆膜方式二因素随机区组田间试验，设置6个不同栽培方式，通过研究不同栽培方式对菘蓝根系农艺性状、板蓝根产量及板蓝根品质指标(R,S)-告依春含量的影响，明确不同栽培方式下菘蓝根农艺性状的累积动态、板蓝根产量高低和有效成分含量的多少，同时建立基于Logistic方程的菘蓝根系主根长、主根直径和单株根干重的模型，从理论上分析不同栽培方式下生物量各指标的变化特征，为河西走廊菘蓝最佳栽培方式的选择提供一定的理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料与试验区概况

试验用种子2014年7月采自甘肃省民乐县六坝镇诚泰药业种植基地。试验于2015年5—11月在甘肃省民乐县六坝镇农业高科技园区进行。试验区位于100°43′28″E, 38°38′36″N，海拔1 824 m；气候干燥，初霜期10月25日，无霜期140 d，作物生长期(4—8月)日照时数1 300 h，年太阳辐射总量587.58 kJ·cm^{-2}。2015年5—11月日均最高温22.26 ℃，降雨量125.4 mm。试验期间具体的降水量和气温变化如图1。试验地土壤为灌淤土，土质为砂质壤土，肥力中等，前茬为马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)。耕作层0~ 20 cm土壤有机质17.8 g·kg^{-1}，有效氮98.6 mg·kg^{-1}，有效磷10.7 mg·kg^{-1}，有效钾157.5 mg·kg^{-1}。

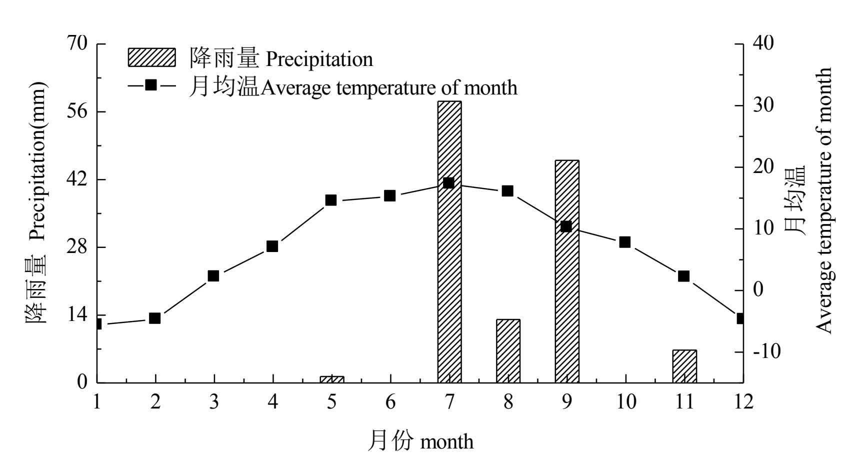


图1　试验年份菘蓝栽培期间气温和有效降雨量的动态变化

Fig. 1　Dynamics of monthly average temperature andprceipitation during cultivation of *Isatis indigotica* in the experiment year

1.2　试验设计

试验为栽培模式和覆膜方式二因素随机区组设计，栽培模式为平作和垄作，覆膜方式为不覆膜、覆白膜和覆黑膜，试验包括：平作不覆膜(PN)、平作覆白膜(PW)、平作覆黑膜(PB)、垄作不覆膜(LN)、垄作覆白膜(LW)、垄作覆黑膜(LB)6个处理组合，具体田间操作见表1。每个处理设3次重复，共18个小区。小区面

积3 m×5 m=15 m^2。小区间距为40 cm，四周保护行宽1 m。黑色和白色塑料膜(PE膜)膜宽80 cm，膜厚0.008 mm，株行距为10 cm×15 cm。

表1　菘蓝不同栽培方式田间操作

Table 1　Field operation of different cultivation methods of *Isatis indigotica*

处理 Treatment	田间操作 Field operation
平作不覆膜 Flat breaking without film mulching (PN)	不起垄，不覆盖，传统栽培模式 Traditional cultivation method, no ridging, no film mulching
平作覆白膜 Flat breaking covering white film (PW)	不起垄，白色PE膜覆盖，膜上穴播 Traditional cultivation with white PE film mulching, and dibbling on film
平作覆黑膜 Flat breaking covering black film (PB)	不起垄，黑色PE膜覆盖，膜上穴播 Traditional cultivation with black PE film mulching, and dibbling on film
垄作不覆膜 Ridge plowing no covering film (LN)	起垄，垄高15 cm，垄宽60 cm，垄间距20 cm；垄上穴播 Ridge is 15 cm high, 60 cm wide, with 20 cm ridges distance. Dibbling on ridges
垄作覆白膜 Ridge plowing covering white film (LW)	起垄，垄高15 cm，垄宽60 cm，垄间距20 cm，垄上覆白色PE膜；膜上穴播 Ridge is 15 cm high, 60 cm wide, with 20 cm ridges distance, and covered with white PE film. Dibbling on film.
垄作覆黑膜 Ridge plowing covering black film (LB)	起垄，垄高15 cm，垄宽60 cm，垄间距20 cm，垄上覆黑色PE膜，膜上穴播 Ridge is 15 cm high, 60 cm wide, with 20 cm ridges distance, and covered with black PE film. Dibbling on film.

1.3　田间管理

于播种前 20 d 按照 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 灌水，播种前 10 d 深翻并平整土地，按照纯氮 180 $kg \cdot hm^{-2}$、五氧化二磷 100 $kg \cdot hm^{-2}$、氧化钾 85 $kg \cdot hm^{-2}$，作为基肥一次性翻入土壤。于 8 月 20 日和 9 月 20 日灌水两次，每次 600 $m^3 \cdot hm^{-2}$，栽培期间结合除草中耕两次，8 月份作好菜青虫的化学防治，未发现病害。于 5 月 10 日播种，播量为 75 $kg \cdot hm^{-2}$，覆膜播种采取膜上穴播，不覆膜播种直接穴播。6 月 5 日出苗，6 月 15 日结合间苗一次性定苗，11 月 5 日收获。

1.4　测定项目和方法

分别于播种后 45 d、75 d、105 d、135 d、165 d 及收获后，进行一次破坏性取样，每个小区随机选取植株 10 株，共 6 次，每次完整挖取植株根系，净土后立即带回实验室，用自来水清洗干净后晾干水分，分别测定单株根长(cm)、根直径(cm)、根干重(g)，以其平均值作为实测值。11 月 5 日按照小区收获根，净土、杂质后在通风干燥处自然晾干，即为板蓝根，测定小区根产量，折算成公顷产量($kg \cdot hm^{-2}$)。将每次测完干重后的板蓝根粉碎，过 60 目筛，装于试剂瓶中备用。待全部测定结束后按照 2015 版《中华人民共和国药典》中规定板蓝根的(R,S)-告依春含量的测定方法测定[1]。

利用 Logistics 生长模型定量描述菘蓝根系农艺性状的动态累积过程：主根长、主根直径和单株根干重。各指标生长进程按照下述方程[17]拟合

$$\bar{y} = K/(1+e^{A+Bx}) \tag{1}$$

式中：$\bar{y}$ 为各指标平均值；x 为生长天数，x∈[45,180]；K 为各指标生长极限值；A、B 为方程参数。

令：

$$y' = \ln[(K-\bar{y})/\bar{y}] \tag{2}$$

$$K = [\bar{y}_2^{\,2}(\bar{y}_1+\bar{y}_3) - 2\bar{y}_1\bar{y}_2\bar{y}_3]/(\bar{y}_2^{\,2} - \bar{y}_1\bar{y}_3) \tag{3}$$

式中：$\bar{y}_1$、$\bar{y}_2$、$\bar{y}_3$ 分别为等间隔测定天数对应的各指标的平均值。可将 Logistic 曲线方程 $y = K/(1+e^{A+Bx})$ 转换为直线方程：

$$y' = A + Bx \tag{4}$$

利用方程估算根系各指标生长高峰起始时间、生长高峰结束时间、增长结束时间、最快增长到达时间、最大增长速率、快速增长持续天数和缓慢增长持续天数[18-19]，见表2。

表2　菘蓝根系生长指标与生长天数配合Logistic方程的参数及其估算公式

Table 2　Parameters of estimated Logistic equations of root growth indexes to growth time of *Isatis indigotica*

生长参数 Regression parameter	估算公式 Estimated equation
生长高峰起始时间 Starting time of rapid accumulation period (t_1) (d)	t_1=[A−ln(2+1.732)]/−B
生长高峰结束时间 Terminating time of rapid accumulation period (t_2) (d)	t_2=[A+ln(2+1.732)]/−B
生长终期 Ending time of accumulation period (t_3) (d)	t_3=(4.595 12+A)/−B
最大生长速率到达时间 Time arrival of maximum accumulation rate (T_M) (d)	T_M=−A/B (拐点处 Inflexion)

生长渐增期持续天数 Duration of gradual increase period (T_1) (d)	$T_1=t_1-0$
生长快增期持续天数 Duration of rapid increase period (T_2) (d)	$T_2=t_2-t_1$
生长缓增期持续天数 Duration of slight increase period (T_3) (d)	$T_3=t_3-t_2$
最大生长速率 Maximum accumulation rate (V_M) (cm·d^{-1})	$V_M=-B·K/A$

K 为根系生长指标的理论最大值; *A*、*B* 为拟合参数。*K* is theoretical maximum root growth index; *A* and *B* are regression parameters.

1.5 数据处理和统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据整理与统计分析，使用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同栽培方式下菘蓝根系各指标动态变化

2.1.1 主根根长动态变化

在不同栽培方式下，菘蓝主根长的实际测定结果均呈现"S"型增长趋势，见图 2A。菘蓝在幼苗期主根长增加较为缓慢；而随着生长进程加快，出苗后 75~105 d 出现增长高峰，日增量以处理 LB 最高，达到 0.22 cm·d^{-1}·株$^{-1}$；随后，主根长增加趋于变缓，在收获期各处理都达到最大根长值。

根据实际测量值采用 Logistic 生长模型进行拟合，结果见表 3。并根据方程按照生长天数为自变量，对不同生长天数的主根长值进行估算，得出理论值并绘制理论主根长增加动态(图 2B)，各处理根长都呈现典型的 Logistic 生长趋势。由表 3 分析可知，不同栽培方式下菘蓝主根长随生育进程的 Logistic 模型拟合效果良好(R^2>0.9, P<0.01)，且处理间菘蓝主根长理论最大值表现为 LB>PW>PB>LW>PN>LN。主根长快速增长期起始于播后 34~39 d，快速增长累积持续时间为 50~63 d，最大根长增长速率为 0.28~0.34 cm·d^{-1}，最大根长增长速率到达时间为 63~86 d，缓慢增长持续天数为 61~78 d，根长增长结束时间为 152~176 d。各处理间比较，LB 主根长增加天数最大，且主根长的理论值最大，说明垄作覆黑膜延长了主根长增长日期，有利于高产。PN 和 LN 主根长增加天数差别较小，且理论根长最小，说明覆膜对根长增长的贡献大于不覆膜；但平作方式下，覆白膜的效益大于覆黑膜，在垄作方式下，覆黑膜的效益大于覆白膜。整体而言，垄作覆黑膜更加有利于主根长的增加。

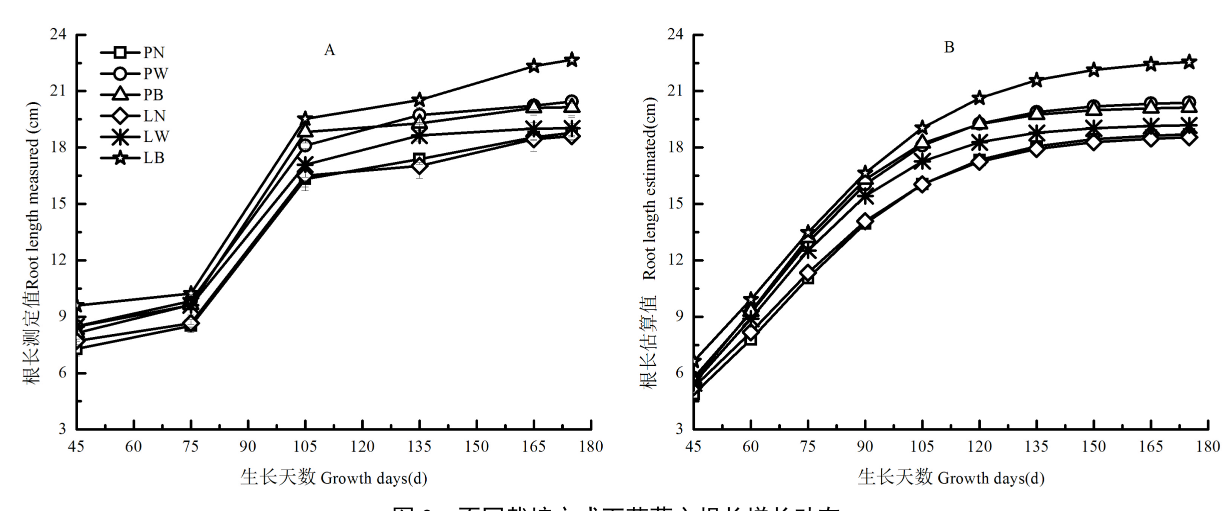


图 2 不同栽培方式下菘蓝主根长增长动态

Fig. 2 Dynamics of root length growth under different cultivation methods of *Isatis indigotica*

表3 不同栽培方式下菘蓝根长动态累积模型参数特征

Table 3 Characteristic parameters of Logistic ($y=K/(1+e^{A+Bx})$) models of root length growth of *Isatis indigotica* under different cultivated methods

处理 Treatment	拟合参数 Regression parameter K (cm)	A	B	R^2	快速生长期 Rapid-increase stage t_1 (d)	t_2 (d)	T_2 (d)	T_M (d)	V_m (cm·d^{-1})	生长渐增期持续天数 Duration of gradual increase period (T_1) (d)	生长缓增期持续天数 Duration of slight increase period (T_3) (d)	生长终期 Ending time of accumulation period (t_3) (d)
PN	18.83	3.150	−0.047	0.935 9**	39	96	56	68	0.28	39	70	166
PW	20.48	3.169	−0.049	0.943 8**	37	91	53	64	0.32	37	66	157
PB	20.18	3.351	−0.053	0.955 4**	38	88	50	63	0.32	38	62	149
LN	18.67	3.000	−0.046	0.931 5**	37	94	58	66	0.29	37	72	166

LW	19.24	3.246	−0.057	0.915 9**	37	88	51	63	0.31	37	64	152
LB	22.78	2.780	−0.042	0.930 1**	35	98	63	66	0.34	35	78	176

K 为理论最大值, *A*、*B* 为拟合参数, t_1 和 t_2 为快速生长期起始和结束时间, T_2 为快速生长期持续时间, V_m 为最大生长速率;. **示 0.01 水平显著。*K* is theoretical maximum; *A* and *B* are regression parameters; t_1 and t_2 are starting and terminating times of rapid increase period; T_2 is duration of rapid increase period; V_m is maximum growth rate; ** means significant difference at 0.01 level.

2.1.2 主根直径动态累积

不同栽培方式下，菘蓝主根直径的实测值均呈“S”型增长趋势(图 3A)。各处理根直径在 45~75 d 处在增长启动期, 75~105 d 出现快速增长，由 0.52 cm 增加到 1.07 cm，生长 105 d 后逐渐进入缓慢增长期，到 165 d 左右达到增长最大值。出苗后 105 d，各处理的主根直径稳定在 0.98~1.17 cm，其后仍然在增加，但增加幅度较小，收获期菘蓝主根直径达到最大值，以处理 LB 主根直径最大(1.17 cm)，且与其他处理差异显著(P<0.05)，其他处理间差异不显著(P>0.05)。

根据实际测量值采用 Logistic 生长模型进行拟合，结果见表 4。并根据方程以生长天数为自变量，绘制理论根直径生长动态，如图 3B，各处理根直径都呈现典型的 Logistic 生长趋势。由表 4 分析可知，不同栽培方式下菘蓝根直径随生育进程的 Logistic 模型拟合效果良好(R^2>0.9，P<0.01)，且处理间菘蓝根直径理论最大值表现为 LB>PN>PW>PB>LW=LN。根直径快速增长期起始于播后 31~47 d，快速增长累积持续时间为 42~60 d，最大根长增长速率为 0.017~0.02 cm·d^{-1}，最大直径增长速率到达时间 59~72 d，缓慢增长持续天数为 53~75 d，根长增长结束时间为 141~176 d。

各处理间, LB 根直径生长天数最大，且根直径的理论值最大，说明垄作覆黑膜延长了根直径生长日期，有利于形成高产; LW 和 LN 根直径理论值最小，说明垄作覆白膜和垄作不覆膜都不利于主根直径的生长。相比较垄作，平作根直径的增长优于垄作。从实际测定结果和理论值分析，垄作覆黑膜对菘蓝主根直径的贡献明显大于其他栽培方式，表现为主根直径最大，快速增长速率最大，增长时间最长，最大增长速率最大等特征。说明垄作覆黑膜更有利于菘蓝根系的生长，促进主根直径的增加，延长根系生长日期。相比较垄作，平作栽培方式也有利于根系的生长，但最终根直径的增加略差于垄作覆黑膜。

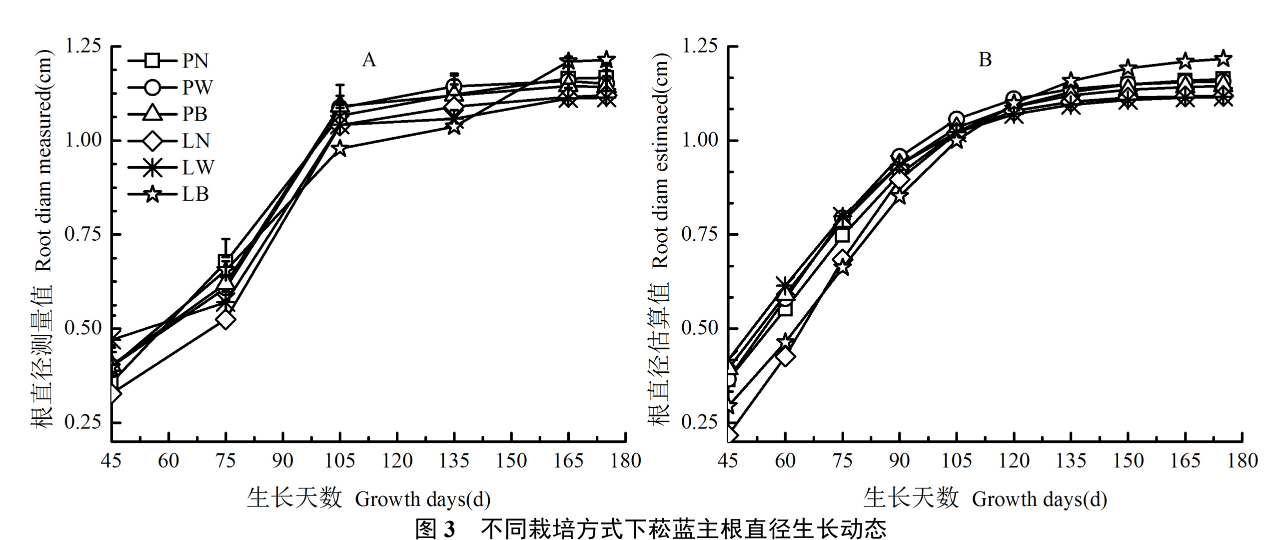


图 3 不同栽培方式下菘蓝主根直径生长动态

Fig. 3 Growth dynamics of root diameter under different cultivation methods of *Isatis indigotica*

表4 不同栽培方式下菘蓝主根直径动态累积模型参数特征

Table 4 Characteristic parameters of Logistic ($y=K/(1+e^{A+Bx})$) models of root diameter of *Isatis indigotica* under different cultivated methods

处理 Treatment	拟合参数 Regression parameter			R^2	快速生长期 Rapid-increase stage					生长渐增期持续天数 Duration of gradual increase period (T_1) (d)	生长缓增期持续天数 Duration of slight increase period (T_3) (d)	生长终期 Ending time of accumulation period (t_3) (d)
	K (cm)	*A*	*B*		t_1 (d)	t_2 (d)	T_2 (d)	T_M (d)	V_m (cm·d^{-1})			
PN	1.17	2.848	−0.046	0.957 3**	34	91	58	63	0.019	34	72	163
PW	1.16	3.1033	−0.052	0.928 8**	35	86	51	60	0.019	35	63	149
PB	1.15	2.7837	−0.047	0.954 4**	31	87	56	59	0.020	31	69	156
LN	1.12	4.2378	−0.063	0.957 8**	47	89	42	68	0.017	47	53	141
LW	1.12	2.6684	−0.045	0.955 6**	30	89	59	60	0.019	30	73	163
LB	1.23	3.1298	−0.044	0.924 4**	41	102	60	72	0.017	41	75	176

K 为理论最大值, *A*、*B* 为拟合参数, t_1 和 t_2 为快速生长期起始和结束时间, T_2 为快速生长期持续时间, V_m 为最大生长速率; **示 0.01 水平显著。*K* is theoretical maximum; *A* and *B* are regression parameters; t_1 and t_2 are starting and terminating time of rapid increase period; T_M is time arrival of maximum accumulation rate; T_2 is duration of rapid increase period; V_m is maximum accumulation rate; ** menas significant difference at 0.01 level.

2.1.3 单株根干重动态累积

不同栽培方式下，菘蓝单株根干重的实际测定结果变化趋势一致，都呈现"S"型的增长趋势(图4A)。生长期内，各处理单株根干重从0.27 g增加到7.51 g；出苗后105 d之前，单株根干重增加迅速，从0.27 g增加到6.46 g，平均日增量0.06~0.09 g·d^{-1}；出苗后135 d开始各处理单株根干重增加缓慢，各处理间日增量维持在0.02~0.03 g·d^{-1}之间，收获期时，各处理单株根干重都达到最大值。不同栽培方式下，菘蓝单株根干重差异显著，处理LB最大，与其他处理达到显著性差异(P<0.05)。

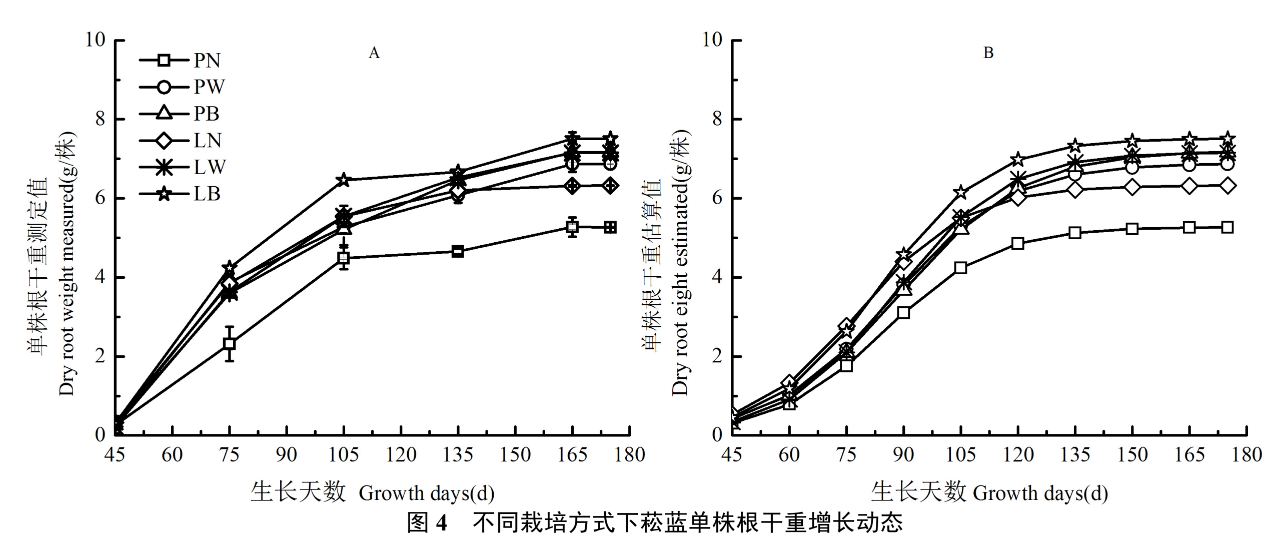


图 4 不同栽培方式下菘蓝单株根干重增长动态

Fig. 4 Growth dynamics of root dry weight in different cultivation methods of *Isatis indigotica*

根据实测值采用Logistic生长模型进行拟合，得到单株根干重如下方程及参数特征值(表5)。并根据方程以生长天数为自变量，绘制理论单株根干重生长动态图(图4B)。各处理单株根干重都呈典型的Logistic生长趋势。由表4分析可知，不同栽培方式下菘蓝单株根干重随生育进程的Logistic模型拟合效果良好(R^2>0.9, P<0.01)，且处理间菘蓝单株根干重理论最大值表现为LB>PB>LW>PW>LN>PN。单株根干重快速增长期起始于播后60~69 d，快速增长累积持续时间为37~43 d，最大单株根干重增长速率为0.062~0.90 g·d^{-1}，最大单株根干重增长速率到达时间76~86 d，缓慢增长持续天数为46~53 d，单株根干重增长结束时间为143~164 d。

各处理间，LB单株根干重理论值最大，说明垄作覆黑膜的单株根产量最高，平作不覆膜单株根干重的理论值最小，产量最低。整体表现为覆黑膜>覆白膜>不覆膜。说明黑膜对单株根干重的贡献最大，不覆膜明显表现为单株根干重较小，不利于产量的提高。

表5 不同栽培方式下菘蓝单株根干重动态累积模型参数特征

Table 5 Characteristic parameters of Logistic ($y=K/(1+e^{A+Bx})$) models of dry root weight per plant of *Isatis indigotica* under different cultivated methods

处理 Treatment	拟合参数 Regression parameter			R^2	快速生长期 Rapid-increase stage					生长渐增期持续天数 Duration of gradual increase period (T_1) (d)	生长缓增期持续天数 Duration of slight increase period (T_3) (d)	生长终期 Ending time of accumulation period (t_3) (d)
	K (cm)	*A*	*B*		t_1 (d)	t_2 (d)	T_2 (d)	T_M (d)	V_m (cm·d^{-1})			
PN	5.28	5.927	−0.069	0.9408**	68	111	43	89	0.081	68	53	164
PW	6.89	5.663	−0.065	0.9497**	66	102	38	85	0.062	66	47	151
PB	7.21	5.507	−0.061	0.9665**	67	107	40	87	0.079	67	50	157
LN	6.33	5.621	−0.071	0.9881**	69	107	38	88	0.082	69	47	154
LW	7.17	6.109	−0.069	0.9587**	60	97	37	79	0.081	60	46	143
LB	7.52	5.914	−0.070	0.9345**	65	102	37	84	0.090	65	46	149

K 为理论最大值, *A*、*B* 为拟合参数, t_1 和 t_2 为快速生长期起始和结束时间, T_2 为快速生长期持续时间, V_m 为最大生长速率; **示 0.01 水平显著。*K* is theoretical maximum; *A* and *B* are regression parameters; t_1 and t_2 are starting and terminating time of rapid increase period; T_M is time arrival of maximum

accumulation rate; T_2 is duration of rapid increase period; V_m is maximum accumulation rate; ** menas significant difference at 0.01 level.

2.2 不同栽培方式对板蓝根产量的影响

从图 5 可知，栽培方式对板蓝根产量的影响明显。方差分析表明，板蓝根栽培模式和覆膜的 *F* 值分别为 6.503 和 100.48，*P* 值均小于 0.05，达显著性水平。栽培模式和覆膜间的交互作用 *F* 值为 80.552，sig.=0.000，也达到极显著水平。说明栽培模式和覆膜情况都对板蓝根的产量产生较大影响。各处理产量为 LB>PB>PN>PW>LN>LW，垄作覆黑膜产量最高，达到 4 514 kg·hm^{-2}，垄作覆白膜产量最低，为 3 116 kg·hm^{-2}。平作不覆膜与平作覆黑膜和垄作覆白膜间产量差异不显著(P>0.05)。

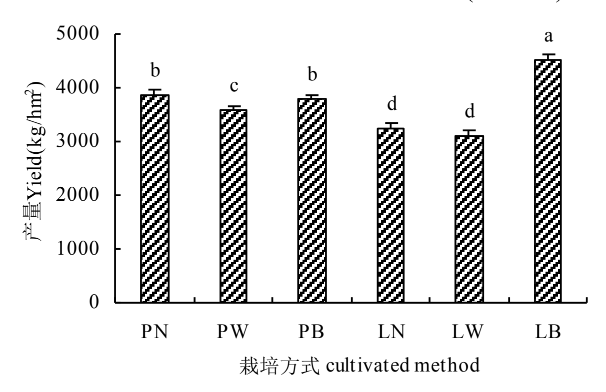


图 5 栽培方式对板蓝根产量的影响

Fig. 5 Effect of cultivation methods on yield of *Isatis indigotica*

2.3 不同栽培方式对板蓝根中(R,S)-告依春含量的影响

从图 6 可知，栽培方式对板蓝根(R,S)-告依春含量的影响明显。方差分析表明，各处理间差异显著，栽培模式和覆膜方式都对板蓝根中告依春含量产生影响。栽培模式和覆膜的 *F* 值分别为 11.764 和 256.481，*P* 值均小于 0.05，达到显著水平；同时栽培模式和覆膜之间的交互作用 *F*=338.765，sig.=0.000，达极显著水平，说明栽培模式和覆膜方式都对板蓝根的(R,S)-告依春含量影响极大。各处理中，垄作覆白膜(R,S)-告依春含量最高，平作覆黑膜和垄作覆黑膜含量次之，垄作不覆膜含量最低。平作覆白膜和垄作覆黑膜差异不显著(P>0.05)。

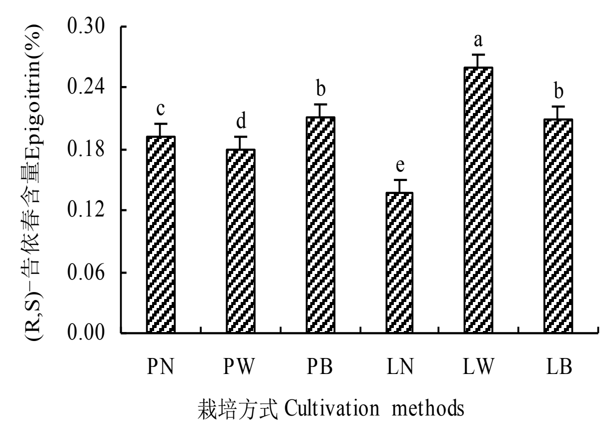


图 6 不同栽培类型对板蓝根中(R,S)-告依春含量的影响

Fig. 6 Effect of cultivation methods on content of epigoitrin of *Isatis indigotica*

3 讨论

植物在生长进程中，各器官的发育符合“慢-快-慢”的“S”型生长曲线。赵亚兰等[20]提出了党参[*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.]种子出苗进程变化趋势呈“S”型曲线，符合 Logistic 方程。陈宇航等[21]在对不同密度下菘蓝的生长动态研究表明，菘蓝的各器官生长动态符合“慢-快-慢”的“S”型生长曲线。刘倩倩[4]对菘蓝的根长生长趋势研究也表明，呈现“S”型趋势。本研究表明，菘蓝主根长、根直径和根干重增长均呈“S”型生长趋势。在不同栽培方式下，菘蓝的根系各指标都能很好地拟合 Logistic 生长曲线，和前人的研究结果相一致。生长前期由于田间通风透光良好，菘蓝叶片产生的光合产物大量运输到地下部，促进了根部性状的快速建成；随着植株新叶不断产生，植株空间逐步缩小，单株光合能力及植株生长受到抑制，导致在生长后期主根长、根直径和根干重增长速率变缓，至采收前 10 d 达到一生中最大值。通过对各处理

的根系各指标进行模型拟合，得出根长、根直径及单株根干重都能很好的拟合 Logistic 曲线，都呈现快速生长期、渐增期、缓增期和结束期 4 个时期。垄作覆黑膜更有利于主根直径和根干重的增加，垄作形成了立体的田间结构，提高了群体的光合能力，延长了菘蓝地上部分的生长期，防止早衰，为后期板蓝根的产量提高提供了更好的田间条件；覆膜有利于增加地温，改善土壤结构，为后期菘蓝根的干物质积累创造了有利条件，为高产奠定了基础。

相比较平作栽培模式，起垄和覆盖都对作物的生长、产量和品质产生一定的影响。有关起垄和覆盖对作物生长的影响，前人作了大量研究。杨长刚等[22]指出，覆膜能提高产量是建立在高生长量，高耗水量的基础上。段义忠等[23]指出，覆膜能提高土壤含水率。付鑫等[24]提出覆膜能改良土壤结构。Wan 等[25]提出覆膜使作物出苗早、出苗率高、产量高、品质好。庞晓攀等[26]提出覆膜能够改善盐碱地作物的生长，利于高产的形成。姜净卫等[27]提出，地膜覆盖促进了籽粒产量的显著提高。李小刚等[28]认为地膜覆盖沟垄栽培模式的集水抑制土壤蒸发效果非常显著。林雁冰等[29]研究表明，覆盖能大幅度增加根区细菌、真菌和放线菌的数量，强化小麦(*Triticum aestivum* L.)根区根外细菌和真菌的数量差异。也有研究表明，覆膜不利于产量的提高，范士杰等[30]对马铃薯不同栽培方式的研究，结果显示地膜覆盖栽培马铃薯的块茎产量比对照降低 15.8%。本研究表明，覆黑膜有利于菘蓝产量的增加，这和前人的研究结果相一致。覆黑膜的增产效果最好。这是因为一方面黑膜改善了土壤环境、提高地温；另一方面黑膜相比较白膜和不覆膜能够防止杂草的生长，降低了土壤养分的消耗，同等条件下能为菘蓝的生长提供了更加有利的生长环境。

垄作可以为作物生长创造有利的微生态环境，促进作物的生长。前人研究表明，垄作具有增产作用[31-32]；增产的原因一是提高了土壤呼吸作用[33]；二是垄作栽培延长了叶片功能期，促进光合产物的积累及向籽粒的转移，有利于后期籽粒充实，千粒重显著高于平作[34]。本研究表明，垄作有利于菘蓝根部干物质的积累，为高产奠定了基础。整体表现为垄作产量高于平作。在不同栽培方式下，以垄作覆黑膜产量最高。垄作覆黑膜改善了群体结构，提高了光能利用率，创造了最佳的生长环境，提高了产量。

药用植物中次生物质的积累是一个非常复杂的生理代谢过程，受到植物本身特性、外界环境条件、不同生长发育阶段等因素的多方面影响[35]。王连喜等[36]认为药材品质优良的核心评价指标是能够客观表征临床功效的药用化学物质组成和量。本研究中，不同栽培方式对板蓝根(R,S)-告依春含量具有显著影响。垄作覆白膜(R,S)-告依春含量最高，平作覆黑膜和垄作覆黑膜含量次之，垄作不覆膜含量最低。栽培模式和覆膜方式二因素综合分析，垄作覆白膜栽培有利于(R,S)-告依春积累，垄作不覆膜效果最差。垄作和覆膜同时对(R,S)-告依春含量产生影响，一方面垄作有利于地温的提高，为根系的生长创造了有利条件；另一方面，白膜有利于太阳光的透射，提高了光能利用率，为(R,S)-告依春的积累提供了有利条件，因此垄作覆白膜(R,S)-告依春含量最高。但是，(R,S)-告依春的合成是一个十分复杂的过程，不同栽培方式对板蓝根(R,S)-告依春合成途径的影响，目前尚不清楚，有待于进一步研究。另外，药用植物是以提供原料药材为栽培目的，药材检测成分的多少最终决定药用价值的高低，不能仅以追求产量为目的。段金廒等[37]提出在考虑产量和品质的前提下，按照单位面积有效成分的产量去评价，本研究综合产量和质量考虑，河西地区垄作覆黑膜栽培菘蓝产量和药材品质均最佳，垄作不覆膜最差。

4 结论

菘蓝根系各指标随生育进程的动态变化符合 Logistic 生长模型。各处理间比较，覆膜的各指标理论值大于不覆膜，快速累积期提前，持续时间较长，垄作覆黑膜的栽培方式下，根长、根直径和单株根干重的理论值都明显高于其他处理，平作不覆膜和垄作不覆膜的各指标理论值最小，说明覆黑膜和垄作的增产效应明显。不同栽培方式下单位面积板蓝根的产量以垄作覆黑膜最高。不同栽培方式下垄作覆白膜的告依春含量最高。综合板蓝根产量和告依春含量，垄作覆黑膜为最佳栽培方式。

参考文献 References

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015 年版 一部)[M]. 北京：中国医药科技出版社, 2015

Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (One)[S]. Beijing: China Medical Science Press, 2015

[2] Shan J J, Zhao C Z, Li Q, et al. An arabinogalactan from *Isatis indigotica* and its adjuvant effects on H1N1 influenza and hepatitis B antigens[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 631–642

[3] Cao Y, Xu X, Zhang P Y. Advances in the traditional Chinese medicine-based management of viral myocarditis[J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2015, 73(1): 237–243

[4] 刘倩倩. 不同品种类型菘蓝生长发育规律及遗传多样性研究[D]. 南京：南京农业大学, 2013: 12–15

Liu Q Q. Study on growth and development regularity in the varieties and genetic diversity of *Isatis indigotica*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 12–15
[5] 薛兴林, 周志龙. 河西干旱地区板蓝根高效节水栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2015, (12): 87–88
Xue X L, Zhou Z L. The highly effective water-saving cultivation technology of radix isatidis in Hexi dry regions[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2015, (12): 87–88
[6] 巴兰清. 民乐县垄作覆膜板蓝根套种王不留行高效栽培技术[J]. 中国农技推广, 2015, 31(4): 34–35
Ba L Q. The highly effective cultivation technology of trailing ridger mulcher radix isatidis relay cropping semen vaccariae in Minle County[J]. China Agricultural Technology Extension, 2015, 31(4): 34–35
[7] 甄东升, 侯格平, 姜青龙, 等. 甘肃省河西走廊板蓝根全膜穴播栽培技术要点[J]. 农业科技与信息, 2015, (12): 63
Zhen D S, Hou G P, Jiang Q L, et al. The whole film dibbling cultivation techniques of radix isatidis in Hexi Corridor[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2015, (12): 63
[8] 侯格平, 甄东升, 姜青龙, 等. 民乐县板蓝根高产优质栽培试验研究[J]. 农业科技通讯, 2015, (9): 132–134
Hou G P, Zhen D S, Jiang Q L, et al. Study on cultural techniques of high yield and quality of radix isatidis in Minle County[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2015, (9): 132–134
[9] 徐文科, 乔钰. Logistic 方程组的统计模型及对红松单木生长的拟合[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 68–71
Xu W K, Qiao Y. Statistical model of Logistic equations and individual tree growth fitting of *Pinus koraiensis*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(10): 68–71
[10] 张彩琴, 杨持. 内蒙古典型草原生长季内不同植物生长动态的模拟[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3618–3629
Zhang C Q, Yang C. Simulation of growth dynamics of four plants in the typical steppe of Inner Mongolia in growing season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3618–3629
[11] 唐翠翠, 黄文江, 罗菊花, 等. 基于相关向量机的冬小麦蚜虫遥感预测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 201–207
Tang C C, Huang W J, Luo J H, et al. Forecasting wheat aphid with remote sensing based on relevance vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 201–207
[12] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32–38
Qiao J, Zhu J C, Zhao J, et al. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5): 32–38
[13] 马新明, 杨娟, 熊淑萍, 等. 烟草根系形态发育模拟模型[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2421–2427
Ma X M, Yang J, Xiong S P, et al. A model for simulating root morphological development of tobacco[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(12): 2421–2427
[14] 陈亚楠, 郭满才, 梁宗锁, 等. 丹参根部生长规律 Logistic 模型研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(7): 1583–1588
Chen Y N, Guo M C, Liang Z S, et al. Growth rhythm logistic model of *Salvia miltiorrhiza* Bunge root traits[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(7): 1583–1588
[15] 张文辉, 刘祥君, 刘国彬, 等. 川西北泡沙参种群根系生长动态及其与环境因素关系研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 39–43
Zhang W H, Liu X J, Liu G B, et al. Root growth dynamics of *Adenophora potaninii* populations and its relation with environmental factors in northwest Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 39–43
[16] 王文康, 杜汉强, 陈双恩. 亚麻根系生长动态规律的研究[J]. 中国麻业科学, 2014, 36(3): 127–130
Wang W K, Du H Q, Chen S E. Dynamic growth of flax root[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2014, 36(3): 127–130
[17] 陈翔, 孙云波, 陈垣, 等. 浸种温度对红芪(*Hedysarum polybotrys*)种子发芽的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 632–638
Chen X, Sun Y B, Chen Y, et al. Effects of soaking temperature on seed germination characteristics of *Hedysarum polybotrys*[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 632–638
[18] 王永辉, 郭凤霞, 陈垣, 等. 野生高乌头开花习性及种子灌浆特性研究[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 76–82
Wang Y H, Guo F X, Chen Y, et al. A study on blossoming habit and seed filling characteristics of wild *Aconitum sinomontanum*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 76–82
[19] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 垄覆黑膜沟覆秸秆促进夏玉米生长及养分吸收[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 122–130
Yin M H, Li Y N, Li H, et al. Ridge-furrow planting with black film mulching over ridge and corn straw mulching over furrow enhancing summer maize’s growth and nutrient absorption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22): 122–130
[20] 赵亚兰, 陈垣, 郭凤霞, 等. 冬播和春播育苗对党参苗栽产量和质量的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 139–148
Zhao Y L, Chen Y, Guo F X, et al. Effects of sowing time on yield and quality of *Codonopsis pilosula* seedlings[J]. Acta

Prataculturae Sinica, 2015, 24(10): 139–148
[21] 陈宇航，田汉卿，郭巧生，等. 种植密度对菘蓝生长动态及产量的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(22): 2599–2602
Chen Y H, Tian H Q, Guo Q S, et al. Effects of various planting densities on dynamic growth rhythm and root yield of *Isatis indigotica*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008, 33(22): 2599–2602
[22] 杨长刚，柴守玺，常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2676–2685
Yang C G, Chai S X, Chang L. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2676–2685
[23] 段义忠，亢福仁. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水热状况及其水分利用效率的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 55–59
Duan Y Z, Kang F R. Influences of different mulching treatments on soil temperature, water content, and water use efficiency of dryland planted with potato[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 55–59
[24] 付鑫，王俊，刘全全，等. 不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1423–1430
Fu X, Wang J, Liu Q Q, et al. Soil aggregate and organic carbon contents with different surface mulching under dryland farming system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1423–1430
[25] Jiang W, Wu Y, Jiang D, et al. Effects of different cultivation methods on growth, yield and quality of cassava[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(10): 2086–2090
[26] 庞晓攀，张静，刘慧霞，等. 地膜覆盖对盐碱地紫花苜蓿生长性状及产量的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(9): 1482–1488
Pang X P, Zhang J, Liu H X, et al. Effects of plastic-film mulch on growth traits and yield of alfalfa (*Medicago sativa*) in saline-alkaline fields[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(9): 1482–1488
[27] 姜净卫，董宝娣，司福艳，等. 地膜覆盖对杂交谷子光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 154–158
Jiang J W, Dong B D, Si F Y, et al. Effect of different plastic mulching patterns on photosynthetic characteristics, yield, and water use efficiency of hybrid millet[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 154–158
[28] 李小刚，李凤民. 旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4630–4638
Li X G, Li F M. Soil organic carbon balance and nitrogen cycling in plastic film mulched croplands in rainfed farming systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4630–4638
[29] 林雁冰，薛泉宏，颜霞. 覆盖模式及小麦根系对土壤微生物区系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1389–1393
Lin Y B, Xue Q H, Yan X. Effect of mulching mode and wheat root on soil microbial flora[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1389–1393
[30] 范士杰，王蒂，张俊莲，等. 不同栽培方式对马铃薯田间土壤温湿度及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 216–221
Fan S J, Wang D, Zhang J L, et al. Effects of different cultivation techniques on soil temperature, moisture and potato yield[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 216–221
[31] 张友昌，张教海，王孝纲，等. 垄作的生理生态效应研究进展[J]. 棉花科学, 2012, 34(6): 3–8
Zhang Y C, Zhang J H, Wang X G, et al. Advances of physiological and ecological effects of ridge culture[J]. Cotton Sciences, 2012, 34(6): 3–8
[32] 李永平，杨改河，冯永忠，等. 黄土高原土壤风蚀区玉米起垄覆盖集水效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 59–65
Li Y P, Yang G H, Feng Y Z, et al. Catchment effect of ridging and mulching in maize field in soil wind erosion area of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 59–65
[33] 张赛，罗海秀，王龙昌，等. 保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 913–920
Zhang S, Luo H X, Wang L C, et al. Analysis of soil respiration and the influencing factors in soybean fields under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 913–920
[34] 马丽，李潮海，付景，等. 垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7141–7150
Ma L, Li C H, Fu J, et al. Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7141–7150
[35] 严辉，段金廒. 我国药材采收现状的分析与探讨[J]. 中国现代中药, 2009, 11(8): 11–16
Yan H, Duan J A. Analyses and discusses of Chinese medicinal harvesting time in the present situation[J]. Modern Chinese Medicine, 2009, 11(8): 11–16

[36] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 20(2): 447–454
Wang L X, Chen H L, Li Q, et al. Research advances in plant phenology and climate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 20(2): 447–454
[37] 段金廒, 严辉, 宿树兰, 等. 药材适宜采收期综合评价模式的建立与实践[J]. 中草药, 2010, 41(11): 1755–1760
Duan J A, Yan H, Su S L, et al. Establishment and practice for evaluating model of best harvest time of traditional Chinese medicinal materials[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2010, 41(11): 1755–1760